

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7673090号
(P7673090)

(45)発行日 令和7年5月8日(2025.5.8)

(24)登録日 令和7年4月25日(2025.4.25)

(51)国際特許分類

F I

G 2 1 C 7/26 (2006.01) G 2 1 C 7/26

G 2 1 C 7/22 (2006.01) G 2 1 C 7/22

G 2 1 C 3/326(2006.01) G 2 1 C 3/326

請求項の数 16 (全23頁)

(21)出願番号	特願2022-558244(P2022-558244)	(73)特許権者	522223039
(86)(22)出願日	令和3年3月26日(2021.3.26)		ロールス・ロイス・エスエムアール・リ
(65)公表番号	特表2023-520355(P2023-520355		ミテッド
	A)		イギリス国ダービーシャー ディーイー
(43)公表日	令和5年5月17日(2023.5.17)		2 4 ・ 8 ビージェイ, ダービー, ムーア
(86)国際出願番号	PCT/EP2021/057873		・ レーン, ケア / オブ・ロールス・ロイ
(87)国際公開番号	WO2021/191407		ス・ピーエルシー
(87)国際公開日	令和3年9月30日(2021.9.30)	(74)代理人	100108453
審査請求日	令和6年3月13日(2024.3.13)		弁理士 村山 靖彦
(31)優先権主張番号	2004454.1	(74)代理人	100110364
(32)優先日	令和2年3月27日(2020.3.27)		弁理士 実広 信哉
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)	(74)代理人	100133400
			弁理士 阿部 達彦
		(72)発明者	ダニエル・ロバートソン
			イギリス・ダービーシャー・DE 2 4 ・
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 原子炉制御装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子炉のための原子炉制御システムであって、
中性子吸収材料を含む1つ以上の中空管であって、第1の端部及び第2の端部をそれぞれ有している1つ以上の前記中空管と、
前記中空管の内部における第1の流体の量を制御するように動作可能とされるポンプであって、前記第1の流体が中性子減速材を含む、前記ポンプと、
を備えている原子炉制御システムにおいて、
前記ポンプが、前記原子炉の内部における反応度のレベルに基づいて制御されるように構成されており、
前記中空管の前記第2の端部が、第2の流体と流体連通しており、前記第2の流体の中性子減速能が、前記第1の流体の中性子減速能の10%より低く、
前記第1の流体が、水であり、前記第2の流体が、蒸気であり、
前記ポンプが、前記ポンプを貫流するように前記第1の流体を駆動することによって、前記中空管それぞれの前記第1の端部から前記第1の流体を引き込むように構成されている、原子炉制御システム。

【請求項 2】

前記ポンプが、ポンプインペラである、請求項1に記載の原子炉制御システム。

【請求項 3】

前記原子炉制御システムが、第3の流体で前記中空管を急速に充填する手段を備えてい

る、請求項 1 又は 2 に記載の原子炉制御システム。

【請求項 4】

前記第 3 の流体が、前記第 1 の流体とさらなる中性子吸収材とを含んでいる、請求項 3 に記載の原子炉制御システム。

【請求項 5】

前記原子炉制御システムが、前記中空管の前記第 1 の端部と前記ポンプとの間に制御オリフィスを備えており、前記制御オリフィスが、前記第 1 の流体のリザーバと流体連通している、請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

【請求項 6】

前記中空管の前記第 2 の端部が、蒸気空間と流体連通しており、前記蒸気空間が、前記原子炉の原子炉圧力容器と流体連通している、請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

10

【請求項 7】

前記ポンプが、信号に応答して前記第 1 の流体の量を制御することによって前記ポンプを急速に停止させるための機構であって、モータシャフトのブレーキ、インペラと前記モータシャフトとの磁気結合、ポンプ電力コントローラのブレーキ抵抗器、さらなる流体を前記中空管に追加するように動作可能なさらなる弁又は流体装置のうち 1 つ以上を含む前記機構に装着されている、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

【請求項 8】

前記原子炉制御システムが、前記原子炉の温度が所定の閾値温度に到達するまで、前記ポンプが前記中空管の内部における前記第 1 の流体の量を減少させるのを阻止するためのインターロックシステムを備えている、請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

20

【請求項 9】

前記原子炉制御システムが、前記中空管の内部における前記第 1 の流体の深さを示す測定値を提供するように動作可能なセンサを備えており、前記ポンプが、前記第 1 の流体の必要とされる深さを所定のレベルに維持するように制御可能である、請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

【請求項 10】

少なくとも 1 つの管が、前記管の長さの一部に吸収材料を備えており、これにより、前記管が前記原子炉の炉心に嵌合された場合に、前記炉心の第 1 の部分の反応度が、前記炉心の第 2 の部分から独立して制御される、請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

30

【請求項 11】

前記中空管が、矩形状の断面又は閉じた断面を有している、請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

【請求項 12】

2 つ以上の前記中空管が存在する場合には、前記原子炉制御システムが、多対一の接続マニホールドを備えており、前記接続マニホールドが、2 つ以上の前記中空管と前記原子炉の出口パイプとを流体接続するように構成されている、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の原子炉制御システム。

40

【請求項 13】

請求項 1 から 12 のいずれか一項に記載の原子炉制御システムを備えている、原子炉。

【請求項 14】

接続マニホールドが、炉心自体と前記炉心内部の燃料集合体との両方に構造サポートを提供するために、前記原子炉の炉心支持体の構造部品を形成している、請求項 12 に従属する請求項 13 に記載の原子炉。

【請求項 15】

原子炉の燃料集合体が、

核分裂材料を含む 1 つ以上の燃料棒と、

50

1つ以上の中空管と、
接続マニホールドと、
を備えており、

前記接続マニホールドは、前記燃料集合体の前記燃料棒を位置決めするように構成されている構造体を備えている、請求項12に従属する請求項13に記載の原子炉又は請求項14に記載の原子炉。

【請求項16】

原子炉を制御するための方法であって、

中性子吸収材料を含む吸収性の中空管を前記原子炉の炉心の内部に設けるステップと、

前記中空管に接続されたポンプを設けるステップと、

前記炉心の反応度を所望のレベルに維持するために、前記中空管それぞれから減速流体を引き込むことによって、前記中空管の内部における減速流体の量を制御するように、前記ポンプを貫流するように前記減速流体を駆動するステップであって、前記減速流体が水である、前記ステップと、

を備えている方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は原子炉に関する。

【背景技術】

【0002】

原子力発電所は、原子炉内の燃料集合体に含まれる核分裂材料の核分裂からの熱エネルギーを電気エネルギーに変換する。原子炉は、核分裂性燃料と、核分裂の速度を高めるために放出された中性子を調整する減速材とを必要とする。それらはまた、必要とされるときに核分裂の速度を制御するために中性子束を減少させるために制御機構も必要とする。

【0003】

原子炉は、選択された燃料で中性子の衝突断面を拡大するために中性子を減速させるために減速材を有してもよい。水減速原子炉は、減速材として軽水又は重水を使用する。軽水原子炉（LWR）は、冷却剤及び中性子減速材の両方として通常の水を使用する原子炉である。既知のタイプの軽水原子炉は、沸騰水原子炉（BWR）と、加圧水原子炉（PWR）とを含む。重水原子炉（HWR）は、重水素が、より低い吸収断面を有し、より低い核分裂性内容物での燃料の使用を可能にするため、増大した重水素含有量を有する水を使用する。

【0004】

加圧水原子炉（PWR）原子力発電所は、典型的には次の加圧された構成要素、すなわち燃料集合体を収容する原子炉圧力容器（RPV）と、1つ又は複数の蒸気生成器と、加圧器に接続する一次冷却材回路を有する。一次回路における冷却剤ポンプは、これらの構成要素の間の配管を通して加圧水を循環させる。RPVは、水を一次回路内で加熱する炉心を収容する。蒸気生成器は、一次回路と、蒸気が生成されてタービンに動力を提供する二次システムとの間の熱交換器として機能する。加圧器は、一次回路内で155バール前後の圧力を維持する。

【0005】

沸騰水原子炉（BWR）原子力発電所は、蒸気が、冷却剤及び減速材の両方として使用される同じ水回路から原子炉容器内に生成される点、及びこの蒸気がタービンを駆動するのに直接使用される点において主に加圧水原子炉とは異なる。したがって、沸騰水原子炉は、蒸気生成器を必要としないが、それ以外の方法で、加圧水原子炉と多くの特徴を共有する。BWRにおいて、炉心より上の原子炉圧力容器の内部に蒸気乾燥機が必要とされる場合がある。水が有益な動作温度で沸騰することを可能にするために、BWRにおける圧力は、PWRより低く、典型的には70から75バールである。

10

20

30

40

50

【0006】

原子炉が始動する、停止する、及び広範囲の電力出力にわたってその出力を調整することを可能にするために、たいていの設計は、何らかの形態の可動吸収材を有する。これは典型的には、可動制御棒集合体である。これは、炉心を停止するためにその中に移動される強力な中性子吸収材を含む集合体である。PWRでは、これは典型的には、原子炉压力容器の取り外し可能なヘッド上にいくつかの制御棒駆動機構（CRDM）を含むことによって達成される。BWRでは、必要な蒸気乾燥機のための空間をRPVの中に形成するために、制御棒は、下から原子炉の炉心に入る。したがってCRDMは典型的には、例えば溶接されたスタブ管とフランジの集合体によって原子炉の底部ヘッドに接続される。

【0007】

制御棒を使用して、原子炉の始動及び停止ならびに通常の動作中の電力出力を制御するが、それらはまた、SCRAMとして知られる緊急停止を行うのにも必要とされる。この機能を提供する機構は、電力が失われた場合、BWR原子炉内で制御棒を取り上げるアクチュエータを供給するために、例えば、制御棒をつり下げる電磁石、ばね荷重式機構又は加圧流体貯蔵庫を含む。

【0008】

従来の制御棒に伴う既知の問題の一部は、ここに列挙されている。

【0009】

安全性の問題

制御棒は、それらが原子炉内に再度挿入されたとき、動かなくなるか、又は過剰な摩擦に遭遇する場合がある。不十分な数の制御棒が再度挿入された場合、原子炉は、停止しない可能性がある。このようなことを緩和するために、制御棒及びその関連するシステムは、極めて高い信頼できる要件及び関連するコストを有し、単一の棒を再度挿入するのに失敗したことを相殺するために、さらなる制御棒を加える必要がある。多くの設計では、制御棒が機能することを信頼することができないとき、二次停止システムが必要とされる。

【0010】

制御棒は原子炉から突き出す場合があり、制御棒駆動装置より上の構造的な故障によって、原子炉から蒸気／水が漏れる可能性がある。原子炉内の漏出点と制御棒集合体との間の圧力差がそれ故、極めて急速に棒を原子炉から外に出して持ち上げる場合がある。このような欠陥は、原子炉を急速に停止させることによって軽減され、これは、この機能をトリガするために複雑で費用の高い計器装備を必要とする。

【0011】

制御棒は、持ち上がるように誤って命令される場合がある。特定の冷温又は低温状態において、これを行うことは潜在的に原子炉が即発臨界になる結果となり、そのようなことが発生することは潜在的に、炉心、原子炉容器及び多くの冷却システムを破壊する可能性がある。このようなことが起こるのを阻止するために、高価な完全性の高い制御システム及び処置を使用する必要がある。

【0012】

各制御棒ハウジングは複数の溶接部を有するため、制御棒集合体は、一次圧力境界の表面積のかなりの増大を生み、それはまた、潜在的な故障地点の数も大いに増大させる。制御棒ハウジングは典型的には、数mmの厚さしかないので、ミサイル、及び他の内部で、又は外部で生成された危険物質から保護する必要がある。

【0013】

費用及び複雑さ

典型的な制御棒スキームでは、制御棒集合体は、1つの燃料集合体を占拠し、1つの制御棒駆動機構（CRDM）によって制御される。典型的な原子炉は、制御棒集合体で燃料集合体の30－100%を有する。図1に見ることができるように、このようなCRDM及びこれらの関連するハウジングは結局、原子炉容器の上部ヘッドに装着されたかなりの体積の装備となる。

【0014】

C R D Mは、安全性が重要であり、したがって、それだけでかなりのコストに相当する。それらはまた、格納容器の外側に設置された高圧電力の電子機器に対して個別に配線される傾向がある。C R D Mはそれ故、一次回路の総コストに関連してかなり大きなコストである。

【0015】

上記に記載されるようなC R D Mハウジングは、非常に多数であり、圧力境界上にあるとき比較的壊れやすい。結果として、それらは高価な位置調整及び稼働中の検査及びメンテナンスを必要とする。

【0016】

反応度の制御

制御棒は、それらは炉心の制限された部分に集中した濃度の高い吸収材であるため、原子炉の炉心の停止時に比較的非効率な空間である。結果として、原子炉は、可用性のホウ素のないプラントとして稼働される場合、必要とされる制御棒の数はかなり大きく、潜在的に燃料集合体の80-100%が制御集合体を必要とすることになる。先に考察したように、C R D Mは高価で大きくて扱いにくく、C R D Mを全ての位置に設けることは費用がかかり複雑である。

【0017】

レイアウト

制御棒システムは、原子炉のレイアウトにかなりの制約を加える。制御集合体は、それが後退することができる圧力境界内の炉心と少なくとも同じ大きさの空間を必要とする。制御集合体はまた、C R D Mと炉心内の制御集合体との間で運動を伝えるのに必要とされる長い駆動棒を有する。

【0018】

C R D Mは従来より圧力境界の外側に設置される。これは、それらが電気接続部及び比較的従来の材料での電磁石又は油圧ピストン及び制御装置を有することを可能にする。C R D Mが圧力境界の内側に設置された場合、電気接続部の高温かつ圧力抵抗性のカプセル化と共に、電磁石のために高温絶縁体が必要になり、コストは、さらなる技術的及び作業のリスクに加えて規模が大きいことによっておそらく増大する。

【0019】

そのような長い列の装備を有する必要性は、典型的なPWRプラント上の原子炉のヘッドが何百トンもの重さになることを意味する。より柔軟なシステムが採用された場合、この空間は、そのような流体接続部、加圧器又は熱交換器又は気水分離器などのプラントの他の部品を配置するために使用される場合もある。

【0020】

BWRでは、気水分離器は炉心より上に配置する必要があるため、それ故制御棒は、炉心の下に配置され、これは、制御集合体を後退させるための空間が炉心の下に配置され、容器内でその位置を上昇させることを意味する。C R D Mは、それ故、容器の底部を貫通する必要があるため、その設計は、いかなる漏出もRPVを排出する可能性があるため、高いレベルの完全性を有する必要があることを意味している。加えて、棒を挿入するのに重力を使用することはできず、それらは、油圧式アキュムレータ内に蓄積されたエネルギーを使用して、又はシステム圧力で一般に挿入される。

【0021】

全体の制御棒機構は、複雑であり、規則的な注意を必要とする。従来のPWR原子炉における制御棒駆動機構は通常、圧力容器ヘッドと組み合わせられ、ヘッドが取り外されるときはいつでも注意して取り扱う必要がある。BWR原子炉におけるC R D Mのメンテナンスは、最も高い照射線量の1つであると言われており、最も物理的にダメージを受け、複雑なメンテナンス活動は、BWR施設によって定期的に遂行される。

【0022】

「Nuclear Naval Propulsion」、Magdi Raheb 2011において、S7G実験用原子炉が考察されている。「S7G炉心は、部分的に水で

10

20

30

40

50

満たされた固定されたガドリニウムクラッド管によって制御された。水は、炉心の内部の管の一部から炉心の上のリザーバまで汲み上げられた、又は管の中に戻るように下に流れることが許可された。炉心内の管のより高い水のレベルは、中性子を減速させ、それらが、ウラン燃料ではなく、ガドリニウム管のクラディングによって捕捉されることを可能にし、出力レベルを下げることに繋がる。この設計は、独自のフェールセーフ制御システムを構成した。ポンプは、汲み上げられる水のレベルを抑制するように継続的に稼働する必要があった。ポンプの動力が事故により失われたとき、全ての水は管の中に戻るように流れ、原子炉を停止する。」S7Gプロトタイプ設計は、中実の制御棒を使用しなかった陸上ベースの原子炉であった。それは、1970年代の終わり及び1980年代の初めにテストされた。この実施の詳細は、基本的な作業原理以外は開示されていない。

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0023】

したがって、全てのタイプの原子炉のために制御機構を改善するための必要性が存在する。信頼性を高め、メンテナンス要件を減少させ、機構を簡素化することは、全て、原子炉制御設計の望ましい特性である。

【課題を解決するための手段】

【0024】

第1の態様によれば、原子炉のための原子炉制御システムが提供され、原子炉制御システムは、中性子吸収材料を含む1つ又は複数の中空管であって、各々が第1の端部及び第2の端部を有する1つ又は複数の中空管と、各中空管の第1の端部に接続され、中空管内の第1の流体の量を制御するように動作可能なポンプであって、第1の流体は中性子減速材を含む、ポンプとを備え、ポンプは、原子炉内の反応度のレベルに基づいて制御され、中空管の第2の端部は、第2の流体と流体連通しており、第2の流体は第1の流体の能力の10%より低い中性子減速能を有する。

20

【0025】

任意選択で第1の流体は水であり、第2の流体は蒸気である。他の流体が使用されて、強力な減速効果を提供する第1の流体を提供し、第2の流体は、減速についてより低い能力を有し、例えば第1の流体の10%未満、又は第1の流体の5%未満、又は第1の流体の1%未満の能力を有してもよい。

30

【0026】

原子炉制御システムは、第3の流体で管を急速に満たす手段を提供してもよい。第3の流体は、第1の流体と、さらなる中性子吸収材とを含んでもよい。そうでなければ第3の流体は、原子炉の炉心の反応度を抑制するために管に噴射することができる別の中性子吸収流体を含んでもよい。

【0027】

原子炉制御システムは、中空管とポンプとの間に制御オリフィスをさらに備えてもよく、制御オリフィスは、第1の流体のリザーバと流体連通している。以下に記載するように、制御オリフィスは、第1の流体の一部がポンプによって管に引き込まれ、オリフィスの両端で較正された圧力降下を生み出すことを可能にする。これは、流体の流量をなおも維持しながら、管の中の必要とされる圧力降下を維持するためにポンプ速度が制御されることを可能にする。これは、圧力降下が流量に基づいて制御されることを可能にし、したがって管の中の流体の高さがポンプでの流量に基づいて制御されることを可能にする。

40

【0028】

中空管の第2の端部は、蒸気空間と流体連通してもよく、蒸気空間は、原子炉の原子炉圧力容器と流体連通している。例えば、BWRでは、管の第2の端部は圧力容器内の蒸気乾燥機より上にあってもよい。蒸気空間が原子炉容器内の加圧された水と等しい圧力にあるとき、ポンプは、原子炉内の圧力に打ち勝つ必要なしに、単に管内の水レベルを調整するために十分な水頭を提供する必要がある。

【0029】

50

ポンプは、例えば、ポンプが向きを変えるのを止めることによって、急速に信号に応答してポンプが第1の流体の量を制御するのを停止させるための機構に装着されてよく、これは、例えば、モータシャフト上のブレーキ、インペラとシャフトとの間の磁気結合、ポンプ動力コントローラにあるブレーキ抵抗器、追加弁又は吸収管にさらなる流体を入れることを可能にするように動作可能な流体装置のうち1つ又は複数を含む。

【0030】

原子炉制御システムは、原子炉の減速材の温度が所定の閾値温度に達するまでポンプが中空管内の第1の流体の量を減少させるのを阻止するためにインターロックシステムを備えてもよい。軽水原子炉などの原子炉では、水温は反応度制御機構を提供し、水が通常の動作温度に達するまでは、吸収材の制御作用を低下させるのは望ましくない場合がある。よって、インターロックシステムは、均衡する動作温度が達成される前は、制御機構の撤退によって制御の暴走が起こり得るのを阻止する。

10

【0031】

原子炉制御システムは、管内の流体の深さを示す測定値を提供するように動作可能な1つ又は複数のセンサを備え、ポンプは、流体の必要とされる深さを所定のレベルに維持するように制御可能である。センサは、レーダセンサ又は光学センサなどの流体の高さセンサであり得る。センサは、管内の水圧を測定する圧力センサであってもよい。

【0032】

1つ又は複数の管は、管が原子炉の炉心に嵌合されたとき、炉心の第1の部分の反応度が炉心の第2の部分に対して独立して制御することができるように、その長さの一部に吸収材料を含んでもよい。異なる管は異なる位置に吸収材料を含んでもよい、あるいは燃料集合体の中の1つ又は複数の管は、同じ燃料集合体内の他の管に対して異なる位置に吸収材料を含む場合もある。

20

【0033】

管は、矩形状の断面又は閉じた断面を有してもよい。

【0034】

2つ以上の中空管が存在する場合、原子炉制御システムは、多対一の接続マニホールドを備えてもよく、接続マニホールドは、中空管の2つ以上と原子炉内の出口パイプとの間で流体接続を提供するように動作可能である。マニホールドは、炉心自体と炉心内の集合体との両方に構造サポートを提供するために、原子炉の炉心支持体の構造部品を形成してよい。

30

【0035】

マニホールドは、燃料集合体の燃料棒を位置決めするようにさらに機能してもよい。

【0036】

本発明の別の態様において、原子炉のための燃料集合体が設けられ、燃料集合体は、核分裂材料の1つ又は複数の燃料棒、中性子吸収材料、例えばガドリニウムを含む1つ又は複数の中空の吸収管を備える。

【0037】

2つ以上の中空管が存在する場合があり、燃料集合体は、多対一の集合体マニホールドを備えてよく、マニホールドは、中空管のうち2つ以上と、燃料集合体の出口パイプとの間に流体接続を提供するように動作可能である。

40

【0038】

本発明の別の態様は、原子炉を制御する方法であり、方法は、原子炉の炉心内に中性子吸収材料を含む中空の吸収管を設けるステップと、炉心の所望のレベルの反応度を維持するために中空管内の減速流体の量を制御するステップとを含む。

【0039】

本発明は、原子炉発電所（本明細書では原子炉と呼ばれる）の一部を備えてよい、又はその一部として含まれてもよい。詳細には、本発明は、加圧水原子炉（PWR）又は沸騰水原子炉（BWR）などの軽水原子炉（LWR）に関する。原子炉発電所は、250から600 MW又は295から550 MWの電力出力を有してよい。

50

【0040】

原子炉発電所は、モジュラー原子炉であってよい。モジュラー原子炉は、現場から離れたところで（例えば工場内で）製造され、その後モジュールは、モジュールと一緒に接続することによって現場で原子炉発電所に組み立てられる、いくつかのモジュールで構成された原子炉と見なされてよい。

【0041】

本開示の原子炉は、加圧水原子炉であってよく、原子炉圧力容器と、1つ又は複数の蒸気生成器と、1つ又は複数の加圧器とを備える一次回路を備える。一次回路は、媒体（例えば水）を原子炉圧力容器を通るように循環させて、炉心内での核分裂によって生成された熱を抽出し、熱はその後、蒸気生成器に送り出され、二次回路に移動される。一次回路は、1から6つの蒸気生成器を備えてよい、又は2から4つの蒸気生成器を備えてもよい、あるいは3つの蒸気生成器を備えてもよい、あるいは上述した数値のいずれかの範囲を有してもよい。一次回路は、1つ、2つ、又は3つ以上の加圧器を備えてよい。一次回路は、原子炉圧力容器から蒸気生成器の各々まで延びる回路を備えてよく、回路は、高温媒体を原子炉圧力容器から蒸気生成器まで運んでよく、冷却された媒体を蒸気生成器から原子炉圧力容器に戻るよう運んでもよい。媒体は、1つ又は複数のポンプによって循環されてよい。いくつかの実施形態において、一次回路は、一次回路内に蒸気生成器ごとに1つ又は2つのポンプを備えてもよい。

10

【0042】

いくつかの実施形態において、一次回路内に循環する媒体は、水を含んでよい。いくつかの実施形態において、媒体は、媒体に加えられた中性子吸収物質（例えば、ホウ素、ガドリニウム）を含んでもよい。いくつかの実施形態において、一次回路内の圧力は、フルパワー動作中、少なくとも50、80、100又は150バールであってよく、圧力は、フルパワー動作中、80、100、150又は180バールに達する可能性がある。いくつかの実施形態において、水が、一次回路の媒体である場合、原子炉圧力容器を出て行く水の加熱された水温は、フルパワー動作中、540から670 Kの間、又は560から650 Kの間、又は580から630 Kの間であってよい。いくつかの実施形態において、水が一次回路の媒体である場合、原子炉圧力容器に戻る水の冷却された水温は、フルパワー動作中、510から600 K又は530から580 Kであってよい。

20

【0043】

本開示の原子炉は、蒸気生成器内において一次回路から、又は原子炉圧力容器内の原子炉の炉心から熱を抽出して、タービンを駆動するために水を蒸気に変換する水の循環ループを備えるタービン回路を備えてよい。実施形態では、タービン回路は、1つ又は2つの高圧タービンと、1つ又は2つの低圧タービンとを備えてよい。いくつかの実施形態において、原子炉は、BWRであってよく、蒸気タービンは、それ自体がタービン回路の一部を形成する原子炉圧力容器内に生成された蒸気によって駆動されてよい。

30

【0044】

タービン回路は、蒸気が蒸気生成器に、又は原子炉圧力容器に戻されるとき、蒸気を水に凝結させるために熱交換器を備えてよい。熱交換器は、ヒートシンクとして機能するために大きな水の塊を有し得る三次ループに接続されてよい。

40

【0045】

原子炉容器は鋼の圧力容器を備えてよく、圧力容器は、5から15 mの高さ、又は9.5から11.5 mの高さであってよく、直径は、2から7 mの間、又は3から6 mの間、又は4から5 mの間であってよい。圧力容器は、原子炉本体と、原子炉本体より上に垂直方向に位置決めされた原子炉ヘッドとを備えてよい。原子炉ヘッドは、原子炉ヘッド上のフランジ及び原子炉本体上の対応するフランジを通過する一連の植え込みボルトによって原子炉本体に接続されてよい。

【0046】

原子炉圧力容器及び関連するプラントは、事故が起こった場合に、水回路からの蒸気を保持するために格納構造の中に収容されてよい。格納器は、15から60 mの直径又は3

50

0 から 5 0 m の直径であってよい。格納構造は、鋼又はコンクリートから形成されてよい、又は鋼で内張されたコンクリートから形成されてもよい。

【0047】

格納器は、1 つ又は複数の持ち上げ装置（例えば有極性クレーン）を収容してよい。持ち上げ装置は、原子炉圧力容器より上で格納器の頂部に収容されてよい。格納器は、原子炉の緊急冷却のために水タンクの中に収容してよい、又は水タンクの外で支持してもよい。格納器は、原子炉の補給、燃料集合体の貯蔵及び格納器の内外での燃料集合体の搬送を可能にするために装備及び施設を収容してもよい。

【0048】

発電所は、原子炉要素を外部の危険物（例えばミサイル攻撃）及び自然災害（例えば津波）から保護するために 1 つ又は複数の土木構造を収容してもよい。土木構造は、鋼又はコンクリート又はそれらの組み合わせから作製されてよい。

【0049】

発明の実施形態をここで、添付の図面を参照して一例として記載する。

【図面の簡単な説明】

【0050】

【図1】従来技術の PWR の概略図である。

【図2】本発明の一例を示す図である。

【図3】満たされたときと、空のときの吸収管を示す図である。

【図4】マニホールドと流体パイプとの間の接続を示す図である。

【図5】燃料集合体のレイアウトを示す図である。

【図6】17×17の格子のロッドガイドのこの例で形成される燃料集合体600の一例のレイアウトを示す。

【図7】3つの代替の燃料集合体と、吸収管のレイアウトを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0051】

図1は、加圧水原子炉（PWR）タイプの示される例における、原子力生成システムにおいて使用するための従来技術の加圧原子炉容器100を示す。原子炉容器100は、原子炉容器本体140内の上部開口を閉鎖し、これにより原子炉容器本体140内の空洞内で燃料集合体／原子炉の炉心（150）を密閉するためのクロージャヘッド130を有する一体式のヘッドパッケージ（IHP）である取り外し可能なクロージャヘッド集合体120を有する。IHPは、囲い（図示せず）の中に複数の制御棒駆動機構（CRDM）110をさらに備える。制御棒駆動シャフト115は、制御棒をCRDMに連結する。また、入口ノズル160、出口ノズル165、炉心バレル170及び炉心支持体175も示されている。見ることにできるように、CRDMは、一体式のヘッドパッケージに装着され、ヘッドが取り外されるときはいつでも注意して取り扱う必要がある。

【0052】

図2は、本発明の一実施形態による軽水原子炉を概略的に示す。軽水原子炉200は、核分裂材料の燃料ピンを含む燃料集合体210を有する。炉心内には、中空の吸収管220があり、これは、ガドリニウム、又は高速中性子より熱中性子に対して著しく高い中性子捕捉断面を有する任意の他の中性子吸収材を有する。これらの管は、管の開放頂端部230が、蒸気を収容している一次回路内の空間240内に配置されるように配置されてよい。管の底部は、パイプ網250に接続されてよく、これはポンプ260に接続される。吸収管は、各燃料集合体を燃料ピン及び吸収管を備えるユニットとして炉心から取り外すことができるように、燃料集合体内の核分裂材料のピンに接続されてよい。管の一端が中性子を強力に減速させる第1の流体に接続され、管の第2の端部がより低い中性子減速能を有する第2の流体に接続されることを提供するレイアウトの変形が企図される。例えば、第2の流体は、第1の流体よりかなり低い密度を有してよく、例えば蒸気であり、あるいは第2の流体は、かなり低い中性子減速断面を有してもよく、窒素などである、あるいはその両方である。

10

20

30

40

50

【0053】

この明細書における管は、別の用途が意図されることを文脈が明確にしなければ、吸収管を指す。

【0054】

ある制御状況では、吸収管は、減速流体、例えば水で満たされる。図2の例では、別の状況にあり、ポンプは、炉心内で減速流体が管から引き抜かれ、それが、減速率の低い流体、例えば蒸気空間から引き出された蒸気で置き換えられるように稼働している。

【0055】

あるいは、管の上端部は、高圧ガス、例えば蒸気などの低い減速断面を有する加圧流体の制御された供給源に接続されてもよく、減速流体のレベルは、減速流体を管から汲み出すことによって、又は加圧流体の圧力を上げたり下げたりすることによって調整することができる。

【0056】

図3は、吸収管230の断面A及びBを示す。高エネルギー中性子 n が核分裂事象によって放出されるとき、最初それは、それが吸収管にぶつかった場合に低い吸収の確率を有する。管が蒸気（例A）で満たされたとき、高エネルギー中性子は、管内の空間に入るとき、及びそこから出るときの両方において、管の壁にあるガドリニウムと相互作用する機会が低い。それが管を通して進むとき、蒸気は水よりも1000倍低い密度の領域にあるため、それが蒸気内で水素原子によって減速されることは起こりにくい。

【0057】

管が水で、又は他の減速材で満たされた場合（例B）、中性子が、減速材料、例えば水中の水素又はジュウテリウムの原子の1つ又は複数の原子核と相互作用する確率は高く、これにより減速される、又は低速にされる。中性子が原子炉冷却材の中を進む典型的な距離は、エネルギーに応じて3mmから45mmの間である。管は、10–25mmの直径であってよい。これは、高速中性子が、管の内部に收容されている間の水との衝突により減速されて熱中性子になる高い確率を保証し、したがって管を出る前に吸収材によって吸収される高い確率を有する。

【0058】

中性子が水素原子核と相互作用するたびに、それは、（中性子と似たような質量である）水素原子核内のプロトンとの弾性衝突において速度を失う。中性子がエネルギーを失うほど、それが管の外へと通過するときに吸収される機会は高くなる。管の中の吸収材料は、より低い中性子エネルギーにおける中性子の場合、例えば速度1200m/s前後の熱中性子の場合、より高い吸収断面を有する。

【0059】

図4は、好適な中性子吸収材についてのMeV（x軸）での中性子エネルギーに対してプロットされたバーン（y軸）での中性子吸収断面のグラフである。グラフは、中性子エネルギー（x軸）とそれらが吸収される機会（y軸）との間に対数関係があるのを示す。より低エネルギーの中性子では、例えば、熱中性子では、この作用は、とりわけガドリニウム（Gd）でより強力になることができる。カドミウム（Cd）、ハフニウム（Hf）又はホウ素（B）は、使用され得る他の強力な中性子吸収材である。当業者は、管内に取り込むことができ、高速中性子よりも熱中性子に対してより高い吸収断面を有する任意の中性子吸収材料を使用することができることを理解するであろう。中性子吸収材料は、管を形成するために使用されてよい、又は管を形成するのに使用される合金又は複合体に形成されてもよい。あるいは、中性子吸収材料は、管の壁に形成された空間内に取り込むこともできる。

【0060】

熱中性子は、0.025eV前後のエネルギーを有するもの、又は減速材との熱平衡に至るまで減速した後、中性子の平均エネルギーを有するものである。高速中性子は、核分裂によって生成された1MeV前後のエネルギーを有するものである。中性子吸収材は、熱中性子の場合、燃料の核分裂断面より高いオーダーであり、かつ高速中性子の場合、燃

10

20

30

40

50

料よりも低いオーダーを有する中性子吸収断面を有する。当業者は、特定の原子炉炉心設計に適合するのに必要とされる中性子吸収材の質量及び断面の計算の仕方を理解するであろう。

【0061】

図2に戻ると、制御オリフィス(270)が、炉心とポンプ(260)との間に挿入されてよい。制御オリフィスは、ポンプが、たいていは好ましくない流れの逆転を生じる可能性のある、ポンプインペラまでずっと蒸気又は他の低減速流体を吸い込むのを阻止するために配管内に挿入されてよい。ポンプの吸引は、制御オリフィスを通過している水がパイプに戻るよう流れ吸収管の中に流れるのを阻止する。ポンプのスイッチがオフにされたとき、水は、制御オリフィスを介して、及び静止したポンプを通る逆向きの流れを介して吸収管に戻るよう流れることができる。動作中の流れの状況下での制御オリフィスの両端の圧力降下をポンプの圧力曲線と一致させることによって、ポンプが動作しているときの管の中の流体の高さを設定することができる。

【0062】

制御オリフィスの代わりに、又はそれに加えて、ポンプ圧力及びしたがって管内の減速材流体の量は、ポンプの可変制御によって、例えば変速駆動装置(VSD)によって制御されてよい。パイプ内の圧力又は管内の流体の深さを測定するためにセンサが設けられてもよく、ポンプは、流体の必要とされる深さを達成するように制御されてよい。この変形形態では、原子炉の炉心内の減速材とは異なる液体減速材を使用することが可能である。

【0063】

水が急速に戻るよう流れることを可能にするために、必要なときにポンプを急速に減速させることが有利であり得る。例えば、緊急時の原子炉の停止又はSCRAM中である。

【0064】

ポンプを急速に減速させることを可能にする特徴は、これに限定するものではないが、モータ電流が失われたときポンプモータをポンプインペラから磁気により切り離すこと、電磁石によって開放状態を保持し、そしてこれにより電流が切断されたときに閉鎖するモータシャフト上のブレーキを含む。変速駆動装置(VSD)などの電力コントローラがポンプを駆動するのに使用されてよく、電力コントローラにおけるブレーキ抵抗器は、ポンプのスイッチがオフにされたとき、ポンプ電気回路内の誘導電流を吸収し、エネルギーを熱として消散してポンプを急速に停止させるのに使用されてよい。

【0065】

システムは、吸収管内へのさらなる流れを可能にするさらなる弁又は流体装置を有して設計されてもよく、これらは、ポンプ電力が失われたときにそれらが機能することを可能にするためにポンプ回路に接続されてよい。例えば、ポンプへの電力供給のスイッチがオフにされたときに開放するソレノイド弁は、すぐに水がポンプ回路に入ることを許し、吸収管内の吸引を低減し、それらをより急速に水で再び満たすことを可能にする。

【0066】

緊急高速停止の場合、別の方法は、蒸気の泡がつぶれるよう蒸気空間内に低温の水を噴霧するステップ、あるいは外部タンクから、又は一次回路内の他の場所から吸収管に直接水を噴射するステップを含む。

【0067】

PWR実施形態では、パイプの頂端部が接続され得る蒸気空間は、PWRプラント全体の加圧器の蒸気空間であってもよく、これは、最小の数の容器内に／領域内にプラント全体をパッケージングするのに有利である。

【0068】

BWRにおいて、蒸気空間は、RPV内の蒸気空間であってもよい。

【0069】

パイプの頂端部のための蒸気空間はまた、その独自の電気ヒータを備えた小型の専用空間であってもよく、これは、プラントの圧力制御が反応度制御から独立することを可能にする。

10

20

30

40

50

【0070】

好ましい設計は、吸収材棒から排水するのに蒸気を使用する。実際には、それらが、室温から350度の間で気体形態である、それらが液体減速材に容易に溶解しない、それらは、放射線照射の下で危険なアイソトープを生成することはない、それらは、それ自体が強力な中性子減速材ではないという条件で、他の材料が使用されてもよい。窒素、ヘリウム又は他の低中性子吸収材又は減速断面ガスが蒸気の代わりに使用されてもよい。管から水を汲み上げる代わりに、ガスが代わりに、管の頂部に噴射されて、水又は他の液体減速材を押し出してもよい。一変形形態では、減速流体と混和しない低減速液体が管の頂部を満たすのに使用される場合もある。

【0071】

吸収管は、炉心内の異なる高さで吸収を選択的に変えるために、可変の高さ及び可変の長さを有してよい。例えば、一部の管は、炉心の上部又は下部のみに吸収材料を有する場合があり、その結果、その部分の反応度は、独立して制御され得る。このような制御は、例えば中性子束センサによる、核分裂活動の測定に応じたものであってよい。

【0072】

ポンプ制御

システムは、原子炉が低温であるとき、すなわち、反応度が通常の動作温度におけるものより高くなる可能性があるとき、ポンプが管を空にすることが不可能にするように設計されてよい。いくつかの方法が想定される。

【0073】

最初に、ポンプは、所定の閾値温度、例えば約300℃の典型的な原子炉動作温度を下回ると動作ができないようにインターロックシステムを有してよい。これは、以下のような手段によって達成することができる。

【0074】

1. 熱膨張を駆動装置として使用してポンプを切り離す、又はポンプにブレーキをかける。ポンプを切り離す、又はロータにブレーキを加えるのにバイメタル作用が使用されてよい。特定の温度で形状を変えるように設計され得る形状記憶合金を使用して、このような移行が所定の温度で急速に起こるようにする。

【0075】

2. 常磁性材料におけるキュリー点移行を利用してポンプを切り離す、又はポンプにブレーキをかける。この解決法では、温度の変化によって常磁性材料はもはや磁石に引き寄せられなくなり、この材料は、特定の温度で発動するように設計されてよい。

【0076】

3. 同様の手段によってポンプモータへの電力接続を切断する。

【0077】

4. 流れ領域の制限のために、システムは、プラントが低温であるとき、流れ領域が、中を通して水を引き込むポンプ能力を制限するように設計されてよく、炉心材料の熱膨張、キュリー点挙動及び水の濃度を使用してこれらの作用を提供してもよい。

【0078】

同様の方法を使用して、蒸気空間が動作するのを阻止し、これによりポンプが管の中に蒸気を引き込むのを阻止する場合もある。あるいは、先のセクションで採用された手段、例えば弁などを使用して流れ空間を管の中へと開放させてもよく、これは、ポンプが作動された場合、それは、閾値温度が達成されるまで、流れ空間を通して水を引き込むことを意味する。

【0079】

集合体の配管工事

吸収材を収容する典型的な原子炉の炉心では、現行の慣例は、炉心を燃料集合体から組み立てることである。燃料集合体を使用することで、燃料を製造し、その部分を取り扱うために送達しやすくすることを可能にし、これは、臨界事故のリスクを低減する。これらの集合体はまた、枯渇したとき、核分裂材料の利用を改善するために組み替える場合もある。

10

20

30

40

50

る。

【0080】

燃料集合体に関して行われたときの以下の記載の全ては、単一のユニット（実際には単一の大型燃料集合体である）として作製される炉心に等しく適用可能である。

【0081】

所与の燃料集合体における吸収材と、この燃料集合体と吸収材を蒸気空間及びポンプ260に接続する配管との間の接続との間に多対一の関係があることが想定される。

【0082】

吸収材の管（220）が燃料集合体内に設置されるシステムの場合、燃料が供給された部分を超える集合体の頂部及び底部において、吸収管は、多対一のマニホールドと一緒に入ることが予測される。これは、パイプマニホールドであり得る、又はそれは、燃料ピンを配置するようにも機能するケーシング又は3-Dプリント要素から作製された中空構造である場合もある。

【0083】

このような状況では、多対一のマニホールドは、各燃料集合体のための単一の入口パイプ又は出口パイプへと下降することが予測される。図4は、そのようなシステムの概略的な描写を示す。このシステムでは、1つの出口520に接続する、集合体510ごとに複数の吸収管230が存在する。この場合の出口は、X/Yプラント配置特徴として使用される場合、円筒形であると仮定されるが、それが回転の拘束ならびにX/Y配置特徴として機能することを可能にする他の形状であってもよい。

【0084】

吸収管からの出口パイプ又は吸収管マニホールドは、吸収管を収容している燃料集合体がRPVに挿入されるとき、収容管によって収容されるように構成される。

【0085】

収容管は、燃料集合体を取り扱うべき厳密さを低減するために、導入特徴（530）を有することが予想される。この設計はまた、管の外側の圍繞流体から集合体に流れ込む水を制限する流れ制限リング（540）も示す。水が、継続的に稼働するポンプの吸引圧力によって管から取り除かれるとき、システムは、厳密に密閉される必要はないが、水の流入は制御され得る。

【0086】

締めり嵌め又は干渉嵌め、差動熱膨張、構成要素の質量によって作動されるCシールなどの圧縮シールなどの密閉の代替の手段が、それ独自で、又は組み合わせて使用することもできる。

【0087】

配管マニホールドを収容する構造はまた、炉心の質量を保持し、燃料集合体を拘束する構造として機能する場合も想定される。構造は、ポンプに戻るようにつながれる。ポンプは、幾何学的形状がBWR循環ポンプと同様であってよく、底部ではなく、原子炉容器の頂部に設置されている。

【0088】

燃料集合体の頂部における接続は、底部において記載したものと同様であると思われるが、それは、炉心に剛性に設置されるのではなく、補給することを可能にするためにそこから離れるように移動させることが可能である。上部マニホールドは、多対一の関係を有し、上部蒸気空間に、又は加圧ガスの供給源にそれを接続するパイプを有する。この上部集合体は、ばねクリップ又は熱膨張に対処することができる他の適合可能な方法によって所定の場所に保持される。

【0089】

代替の方法は、各吸収管にその独自の接続を与え、これは、図5に示される接続の方法と同様である。この配置では、多対一のマニホールドは、燃料集合体の一部であるのではなく、燃料集合体の真下に配置される。マニホールドは、集合体の公差及び炉心内の熱膨張に対処するために十分な柔軟性を有する必要がある。この配置の利点の1つは、異なる

10

20

30

40

50

炉心位置はポンプ接続の異なる配置を有してよく、吸収管、すなわちガドリニウム管が、停止ロッドではなく可燃性毒物として機能することを可能にする特定の場所において吸収材が塞がれることを可能にすることである。

【0090】

吸収材が稼働中に枯渇したとき、吸収材が燃料集合体内の核分裂材料よりもより速い速度で枯渇した場合、補給時にこれらの吸収管を交換することが望ましい場合があることが予想される。

【0091】

上記に挙げたように、完全なシステムは任意選択で、種々の有利な配置で1つ又は多くのマニホールドを含んでよい。

【0092】

1つ又は複数の燃料集合体内の集合体マニホールドは、集合体内の吸収管を、複数の燃料集合体の集合体マニホールドと一緒に接続する接続マニホールドに接続する。集合体マニホールドは、燃料集合体の一部であり、それと共に原子炉に出入りするように移動してよい。各集合体の頂部と底部の両方に集合体マニホールドが存在してよい。原子炉の炉心の頂部と底部の両方に設けられた接続マニホールドが存在してよい。

【0093】

燃料集合体と接続された集合体マニホールドは、例えば、燃料プール内でそこから切り離されてよく、新しい燃料集合体に装着可能であってよい。これは、集合体マニホールドが再利用されることを可能にする。

【0094】

炉心の底部における接続マニホールドは、炉心支持体内に配置されてよく、これは、各組管に個別に装着可能であってよい、又は、各集合体における集合体マニホールドに装着可能であってもよい。炉心支持体内の接続マニホールドは、炉心支持体の構造上の一部を形成し、炉心自体及び炉心内の集合体を支持するのを助けるための構造サポートと、吸収管内の減速流体レベルの制御を提供するための流体接続の両方を提供してよい。したがって接続マニホールドはまた、炉心内の集合体の質量を支持する（これはまた、流体システムの一部として使用され得る内部通路を有する炉心支持構造によって実現される場合もある）支持マニホールドとして機能してもよい。

【0095】

燃料集合体は、個々の吸収管のための接続マニホールドへの接続が、燃料集合体のための配置手段を提供し、そのため燃料集合体が炉心内に正確に位置決めされるように配置されてよい。

【0096】

炉心内に2つ以上の独立した吸収材システムを有することが望ましい場合もある。吸収管の大きな容積を備えた1つのシステムが炉心を停止するのに使用される。より制限されたシステムが、燃料及び可燃性毒物が枯渇したときに、反応度を加える、又は反応度を減じるのに使用されているグレイロッドシステムと同等のものとして使用されてもよい。炉心内で異なる高さ及び異なる水平方向の位置に位置決めされた個々の管は、炉心の異なる部分が異なる反応度のレベルを有することを可能にするために独立して制御されてよい。あるいは、管は、炉心の高さ全体であってよいが、もっぱら管の長さに沿って異なる高さのところに吸収材材料を有する。これは、炉心全体を通して燃焼を均一に均衡させ、燃料棒の動作寿命を延ばすために、炉心の異なる部分の燃焼率が制御されることを可能にしてよい。

【0097】

独立した吸収材システムは、各独立した吸収材システムの入口及び出口が同軸上に設置されるように配管されてよい。これは、補給中に、集合体を配置する、及び集合体を簡素に配置する際、炉心の要素間の公差の積み重なりの影響を低減することになる。あるいは、入口及び出口はまた、それらが同軸上ではないが互いに隣接して設けられる場合、回転防止特徴として使用されてもよい。

10

20

30

40

50

【0098】

吸水管の任意の適合可能な配置に関して、ポンプ（260）への上向き接続は、吸水管からの入口接続及び出口接続が共に燃料集合体の頂部に配置されるように、燃料集合体内に配置されてよいことも想定される。上向き接続が湿式又は乾式のいずれかであるように、流れ制御オリフィス（270）が集合体の頂部又は底部のいずれかに配置されてよい。

【0099】

水／蒸気管が、原子炉の炉心の底部から上向きに突出することができる1つの別の方法が企図されてもよい。この配置では、管は、同じ管の中に降水管及び上昇管を有し、管から蒸気空間までの接続、例えば、炉心の側部まで延びる蒸気管がその後設けられる。この配置は、原子炉が燃料集合体より上に構造を全く必要とせず（必要に応じて燃料集合体を制

10

【0100】

代替の配管

先のセクションにおける解決法は、吸収材が燃料集合体の一部を形成する場合に適用可能である。これは、必須要件ではなく、解決法は、吸収材及び燃料集合体が別個である場合に確立されてよい。

【0101】

先に記載したように、吸収材棒の入口及び出口は、炉心の頂部に配置されてよい。この場合、炉心は、吸収材棒が配置され得る空間を有して原子炉容器内に配置される。この実施形態では、吸収材はその後、単一の集合体又は複数の集合体の一部として炉心内に下げられる。吸収材集合体は、燃料集合体を下げて保持するプレート、ポンプ及び蒸気空間集合体ならびにさらに原子炉ヘッドと一体化され得るという想像も可能である。

20

【0102】

全ての先に記載した解決法では、中性子吸収材は、管の壁の中に保持され、そこで蒸気又は水を使用して集合体の吸収を変化させる。2つの機能が別個であり、蒸気及び水を収容するために密閉された管が、吸収材を収容しているスリーブの内部に配置されるシステムを有することも可能である。

【0103】

これは、吸収材が枯渇した場合、システムの流体を保持している部分を分解せずにスリーブを交換することができるという利点を有する。吸水管が原子炉の一次冷却材と流体連通しておらず、その独自のモータ駆動ポンプ及び蒸気空間を有する別個のループ内に収容されるシステムを設計することも可能である。

30

【0104】

ポンプの位置

システムの配管は、たいていの場合、それが、補給作業中に定期的に移動されないようなやり方でRPVに装着されると思われる。ポンプの位置及び設置の基本的な方法は、以下の通りである。

【0105】

ポンプは、原子炉ヘッド上に設置され、これは、システムを容易に取り外す、交換する、又は維持することを可能にする。しかしながら、公差の積み重なり及びポンプとシステムの上向きの脚部との間の密閉が問題となり得る。ポンプまでの電力ケーブルもまた場合によっては補給中に切断される必要がある。

40

【0106】

ポンプ接続はRPV壁を貫通してよく、これは、プラントが補給されるときにそれが切断されないことを意味する。製造の複雑さは、わずかに大きくなり得るが、動作の複雑さは低くなる。

【0107】

吸収材の幾何学的形状

流体で満たされた管吸収材集合体は、動作するために挿入を必要とする従来の制御集合体に対して利用可能である吸収材の幾何学的形状のかなり大きな自由度を提供してよく、

50

この例は、以下を含む。

【0108】

1. 吸収材は、円筒形以外の幾何学的形状で配置されてよく、プレート、十字及び他の幾何学的形状が可能である。

【0109】

2. 吸収材は、線形に配置される必要はなく、例えば渦巻き状及びジグザグも可能である。これは、燃料ピンがより高い熱伝導を有する幾何学的形状に配置されることを可能にし得る。

【0110】

3. 吸収材は、燃料集合体の垂直方向の長さに沿ってその断面において均一である必要はない。頂部又は底部よりも、集合体の中央でより多くの吸収材の断面が使用されてよい。

【0111】

4. 吸収材は、燃料ピン中心線の周りで半径方向に対称である必要はない。集合体は、吸収を炉心の特有の部分に適応させることを可能にするために故意に非対称であるように設計されてもよい。補給時に、集合体は、動作中又は停止中に吸収をさらに最適化するために、組み替えるために回転されてもよい。

【0112】

5. 異なる目的のための吸収材が、単一の燃料集合体内に交互に配置されてもよく、例えば単一の燃料集合体が2つ以上のポンプ作用回路に接続されてもよい。よって、単一の集合体は、原子炉を停止するために使用される複数の吸収材に接続される1つの回路と、炉心が老朽化するにつれて反応度を修正するのに使用されるさらにより限定されたセットの吸収材を有する第2の回路とを有してよい。供給停止時に、吸収管は反応度を調整するために塞がれてもよいし、開放されてもよい。吸収材のサブセットが、原子炉の炉心内の異なる高さに配置されてもよい。

【0113】

6. 吸収材は、燃料集合体自体の中に配置される必要はなく、吸収材は、集合体の間のラック内に配置される場合がある、あるいはそれらは炉心の縁部の周りに配置される場合もある。

【0114】

7. 吸収材は、三箔形状及び／又はらせん形構造を有することもできる。

【0115】

吸収管は、格子パターンを有する燃料集合体の中に配置されてよく、吸収管は格子内の位置を占めており、燃料ピンは格子内の他の位置を占めている。格子は、正方形のパッキング又は六角形のパッキングで配置されてよい。複数の燃料集合体が原子炉の炉心を形成するために配置されてよい。各燃料集合体内の吸収管の数は、原子炉の炉心内の異なる燃料集合体の間で変化してよい。

【0116】

あるいは、吸収管は、矩形状の断面又は閉じた断面を有してもよく、燃料集合体内で一列の燃料ピンの横に配置されてもよい。吸収管は、このようにして、中空の吸収材プレートを形成してもよい。プレートの両端は、吸収材プレートに対する流体接続を作成することを可能にするためにパイプ又はマニホールドに接続可能である移行セクションを有してよい。吸収管は、セクションの間に中空の多面体の流れ空間を提供するために、互いからずらされた一対の矩形又は六角形の箱セクションを有してよい。吸収材プレート間のそのような中空の多面体の流れ空間はその後、燃料集合体全体を取り囲んでよい。

【0117】

図6は、 17×17 の格子のロッドガイドのこの例で形成される燃料集合体600の一例のレイアウトを示す。格子は、金属バンド（図示せず）によって一緒に保持される。ロッドガイドの格子は、例えば、燃料ロッド601、吸収管602、補給及び／又は貯蔵ロッド603及び計器装備ロッド604を収容してよい。さらに、燃料集合体内の全てのロッドガイドが満たされる必要はない。例えば、1つ又は複数の位置に対するロッドガイド

10

20

30

40

50

は、ロッドを全く収容しない場合もある。計器装備ロッド 604 は典型的には、1 つ又は複数のセンサ、例えば温度センサ、放射束センサなどを収容する。本明細書に開示されるシステムは、吸収管及び燃料棒と一緒に設置される、又は一緒に取り外すことができるように、それらが燃料集合体内と一緒に固定されることを可能にし、その結果それらは、制御棒が補給作業中に切り離されることになるリスクをなくすることができる。

【0118】

図 7 は、中空の吸収材プレート 701 の 3 つの例示の配置を示す。各例において、燃料集合体は、格子の中に配置された複数の燃料棒を備える。レイアウトは図 6 に示されるものと同様である。7A では、吸収材プレート 701 は、矩形形状の断面を有し、これは、矩形の管の内部で減速材流体の流れを可能にするために中空である。吸収材プレートは、燃料棒及び吸収管が単一のユニットとして原子炉に挿入され得る、又は原子炉から取り出すことができるように燃料集合体に装着されてよい。7B では、吸収管は、減速材流体の流れを可能にするために間に中空の空間を有して一対の矩形の管から形成される。7C では、吸収材プレート 701 は、隣接する燃料集合体の間の空間内に配置され得る中空の十字架状の形状に形成される。燃料集合体は、計器装備ロッド又はさらなる吸収管を収容してもよい。

【0119】

炉心と中性子反射材との間で炉心の周りに配置された吸収材を使用して、その外側に設置された反射材から中性子をブロックすることができる。臨界が中性子反射材によって維持される原子炉設計では、これは、プラントを停止するために極めて高い制御権限を有する。

【0120】

プラントを受動的に停止する方法

従来の制御棒（従来技術）では、電力は CRDM から取り出されて、重力の下にそれらを下降させることを可能にすることができる。これは、センサ読み取り値に対する電子制御装置及び計測装備（EC&I）がトリガした反応によって、EC&I システムにおける故障又はオペレータの行動によって制御される。

【0121】

以下の方法のいずれかが単独で、又は組み合わせて使用されて、ポンプの出力をカットし、水が管の中に流れるのを可能にしてよい。システムを事故に対して受動的に反応させるために他の方法が使用される場合もある。

【0122】

高温：上記に開示された方法は、例えば原子炉が不十分な温度にあるときにポンプが動作するのを阻止するためのポンプシャフトの熱膨張の利用は、ポンプに高温閾値での動作を止めさせ、水が吸収材チャンネルに流れ込むのを可能にするために、異なる材料選択及び幾何学的形状で適合されてもよい。

【0123】

低温：即発臨界が起こるのを阻止するための先に考察した方法。

【0124】

加圧器からの蒸気の漏出：加圧器内の水のレベルは、一次回路全面にわたって水が沸騰し始めその体積を増やすときに上昇し、これにより水はシステムへの蒸気入口を越え、水が吸収管に流れ込むようにする。水のレベルより上の蒸気入口の高さが、この作用を達成するために選択される必要がある。

【0125】

システム圧力の削減：プラント圧力を放出するために受動減圧弁が開放して、安全システムによって重力の下で水がプラント内に汲み上げられることを可能にする。減圧弁は、水入口を越え、制御オリフィス（270）と吸収管（220）の頂部との間の圧力差を増大させ、水がポンプ圧に対抗して制御オリフィスを通して吸収材の中に吸い込まれるように、加圧器内に配置される。

【0126】

増大したシステム圧力：これは通常、ポンプが過剰な温度の場合に対して提案された方法によって停止され得る場合において増大したシステム温度と関連付けられる。

【0127】

両方の場合においてポンプへの電力をカットするのに受動圧力感知回路遮断器が使用されてよい。

【0128】

低減されたシステムの水のレベル：プラント内の小さな漏出は、それが動作圧力のままである間、それが蒸気／水を失うことを許す可能性がある。この場合では、システム内の水の体積が減少するにつれて、加圧器内の水のレベルが下がる。この状況を検知し、より低い位置で弁を開放して水が吸収管に流れ込むのを可能にするために、受動フロート弁が必要な水のレベルに設置されてよい。

10

【0129】

加圧器内の蒸気の泡が圧力の増加によってしばむ場合、水は吸収管に流れ込み、反応度を急激に低下させる。

【0130】

低い水のレベルでポンプを停止するための別のデバイスは、動的に加熱されたキュリー点弁であってよい。この弁は、ポンプが動的な電流流れである場合にポンプと同じ回路に接続される。常磁性材料が、この回路に接続された要素によって動的に加熱され（又は常磁性材料がその要素である）、弁がプラントの水の中に沈められたとき、その温度は、キュリー点より十分に下に維持される。水のレベルが下がる時、要素は、蒸気によってのみ冷却され、そのためその温度は、キュリー点を超えて上昇し、常磁性材料がもはや磁石に引き寄せられないようにする。これは、ばねが弁を開放することを可能にし、（蒸気内の）弁のアクチュエータは、水が管に入ることができるように弁の本体より上のいくつかの距離に配置されることが予測される。

20

【0131】

減速流体を収容しているタンクは、減速流体をタンクから吸収管の中に噴射することができるように、吸収管への弁付きの流体接続で管の高さより上に位置決めされてよい。減速流体を管の中に押しやるために、さらなるポンプがタンクと管との間の流体路に沿って設置されてもよい。緊急状況において反応度を急速に低下させるのを助けるために、ホウ素などのさらなる吸収材の供給源がタンク内に設けられてもよい、又は流体接続されてもよい。例えば、ホウ酸をタンク内の水に加えることができる。あるいは、ホウ素のペレットが、緊急時に管に滴下される場合もある。

30

【0132】

本明細書に記載されるシステムは、中性子吸収材の位置及び幾何学的形状が、特有の効果達成するために適合されてよいという利点を有する。システムは、既存の制御棒システムより機械的な複雑さが低く、また、それが棒の排出又は偽の棒の引き上げによって臨界事故を生じさせることは不可能であるため、本質的により安全である。液体で満たされた管の使用は、反応度の制御が、入口パイプ及び出口パイプを使用して達成されることを意味しており、これは、中実の棒を移動させることに基づく現行のシステムよりもかなり大きな設計レイアウトの自由度を可能にする。

40

【0133】

・この反応度制御システムは、それが、反応度挿入事故を生じさせることが不可能であるように設計されており、それは、棒の突き出し事故（棒が存在していない）を被ることがなく、受動的機械手段（熱膨張駆動式ブレーキ、クラッチ及び弁）が、原子炉が低温であるときに偽の命令が原子炉の臨界状態を呈するのを阻止する。

【0134】

・システムは、スタックロッド又は機械的摩擦による任意の他の問題などの故障の場合を被ることはないが、いかなる機能不全もシステムに水が吸収管の中に戻ることを許可するようにするため、それは本質的にフェールセーフである。

【0135】

50

・望ましくない反応度を加えるための制御システムの能力の排除は、安全性が等級分けされた中性子検出器及び高い完全性の制御システムが必要ないことを意味する。

【0136】

・システムは、それは、吸収材とポンプとの間の多対一の関係により制限された数のポンプによって制御されるため、現行のCRDMシステムよりかなり簡素になる。

【0137】

・システムは、従来の制御棒よりも小さい空間を占め、従来の制御棒は、後退するための空間を必要とし、そして動きを伝えるために長い棒を必要とする。

【0138】

・システムは、吸収材が、それら最も有効である場所に配置され、それらが必要とされない領域からは除去されることを可能にする。例えば、吸収材は、炉心の中心のみに配置することができる。これは、挿入したり後退させたりすることができるようにする必要がある制御棒では不可能である。

【0139】

・吸収管は、燃料棒の燃料集合体に組み込むことができる。従来の制御棒は、燃料集合体内で管の中に位置決めされ、燃料集合体を取り扱っている間に脱落する可能性がある。吸収管が燃料集合体の一部である場合、システムは、各集合体が効果的に制御棒をその中に挿入させるため、燃料の取り扱いをより簡素にし得る。燃料集合体が水中に配置されるとき、吸収管は、所定の場所で、予定外の臨界状態を阻止しており、これは、制御棒が補給中に不適切な場所に配置された場合、従来の燃料集合体ではリスクとなる可能性があった。

【0140】

・好ましい設計は、蒸気を使用して吸収材棒から排水する。実際には、それらが室温から350度の間で気体の形態であること、それらが水に過剰に溶解しないこと、それが放射線照射下で危険なアイソトープを生成しないこと、及びそれらが強力な中性子減速材又は吸収材ではないことを条件に、他の材料が使用されてもよい。窒素又はヘリウムが好適である。管の中の減速流体を排水するのに使用される流体は、例えば水と比較した蒸気などのより低い濃度を有することによって、又は第1の流体の断面の10%を下回る中性子散乱断面を有することによって著しくより低い減速作用を有してよい。

【0141】

・炉心内の異なる高さで吸収を選択的に変えるために、可変の高さ及び可変の長さの管が使用されてよい。これは、燃料棒の燃焼率を制御するために炉心の異なる部分における反応度が独立して制御されることを可能にする。例えばBWRでは、動作中に存在する蒸気ボイドの体積の差によって、炉心の頂部の燃焼率が底部と異なる場合がある。

【0142】

本発明は、上記に記載した一例の実施形態と併せて記載してきたが、本開示が与えられたとき、多くの等価な修正形態及び変形形態が当業者には明らかであろう。したがって、上記に記載される本発明の一例の実施形態は、限定ではなく例示と見なされる。記載される実施形態に対する種々の変更が、本発明の精神及び範囲から逸脱することなく行われてもよい。

【符号の説明】

【0143】

- 100 加圧原子炉容器
- 110 制御棒駆動機構
- 120 クロージャヘッド集合体
- 130 クロージャヘッド
- 140 原子炉容器本体
- 150 炉心
- 160 入口ノズル
- 165 出口ノズル

10

20

30

40

50

- 170 炉心バレル
- 175 炉心支持体
- 200 軽水原子炉
- 210 燃料集合体
- 220 吸収管
- 230 開放頂端部、吸収管
- 240 一次回路内の空間
- 250 パイプ網
- 260 ポンプ
- 270 制御オリフィス
- 510 燃料集合体
- 520 出口
- 530 導入機構
- 540 流れ制限リング
- 600 燃料集合体
- 601 燃料ロッド
- 602 吸収管
- 603 補給及び／又は貯蔵ロッド
- 504 計器装備ロッド
- 701 吸収材プレート
- A、B 吸収管の断面
- n 高エネルギー中性子

10

20

【図面】

【図1】

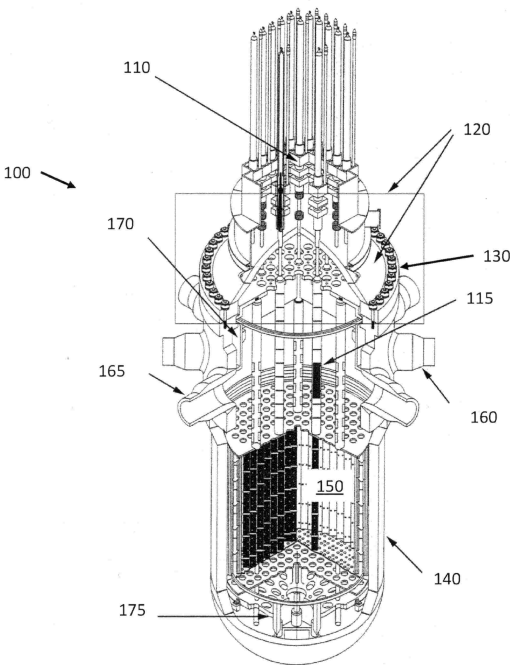


Figure 1 (従来技術)

【図2】

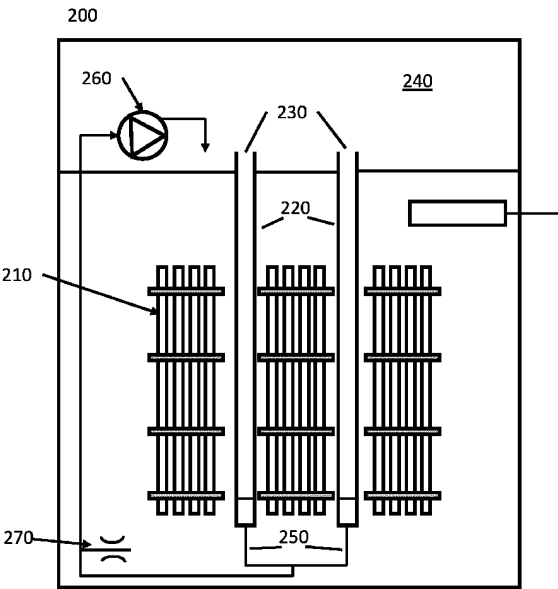


Figure 2

30

40

50

【図 3】

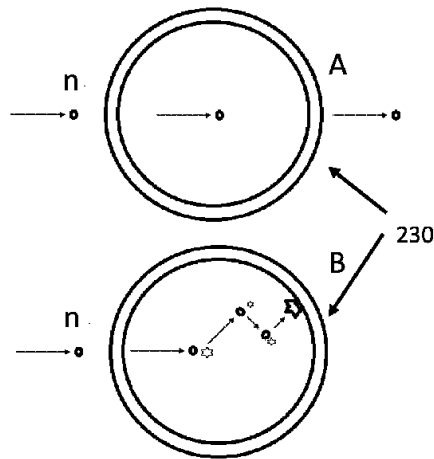


Figure 3

【図 4】

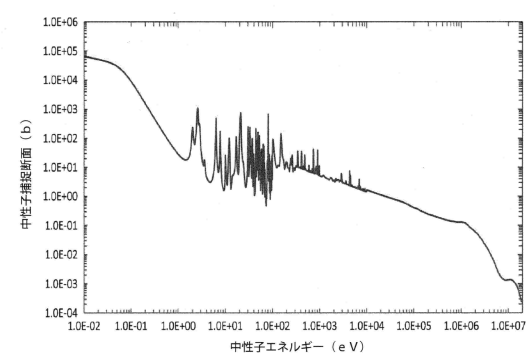


Figure 4

【図 5】

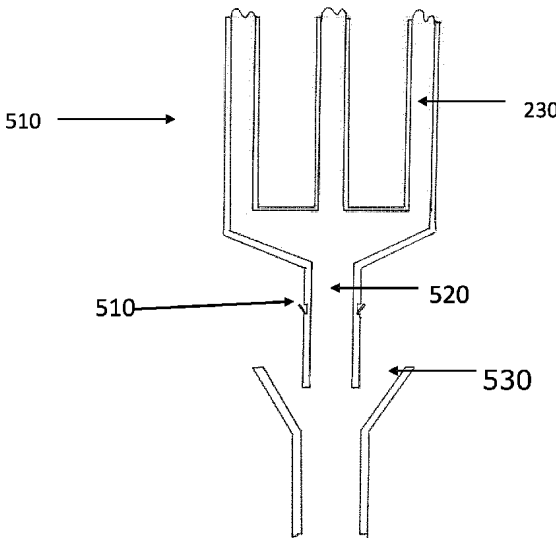


Figure 5

【図 6】

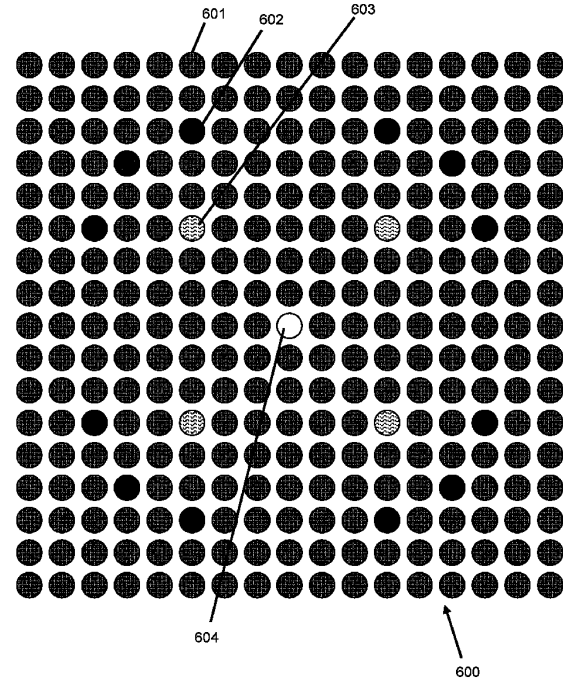
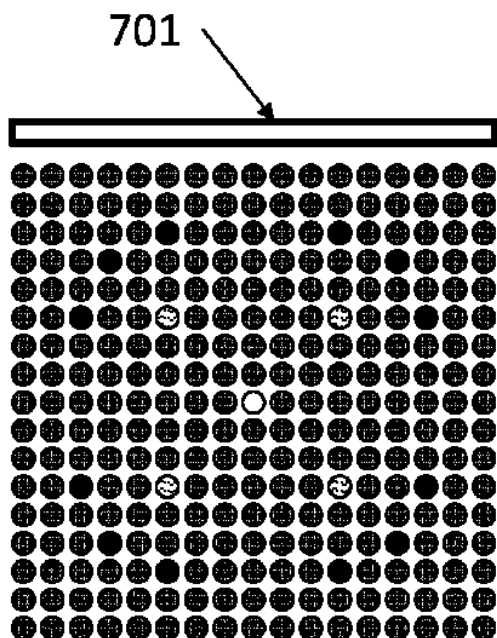


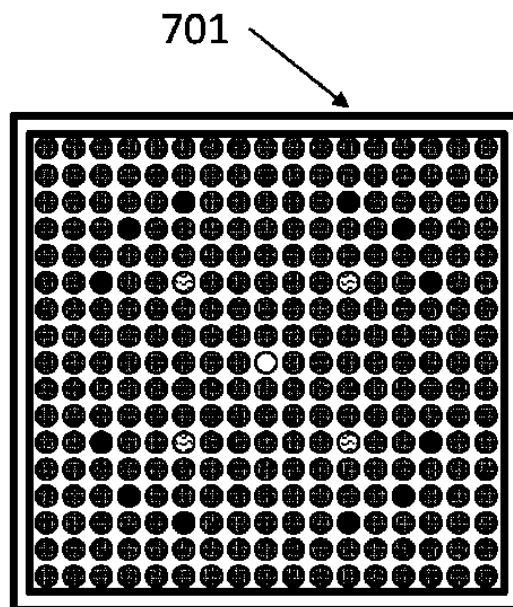
Fig. 6

【図 7 A】



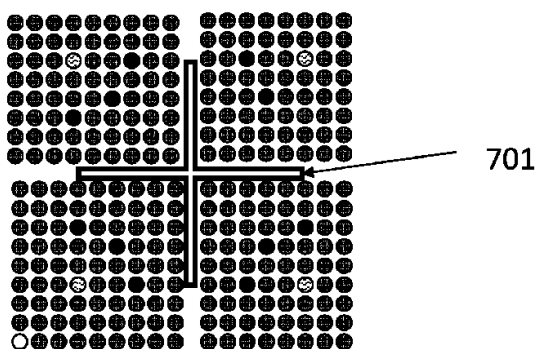
A

【図 7 B】



B

【図 7 C】



C

10

20

30

40

50

フロントページの続き

- 8 B J ・ ダービー ・ ピーオー ・ ボックス ・ 3 1 ・ ロールスーロイス ・ ピーエルシー内
(72)発明者 ブレット ・ ロングスタッフ
イギリス ・ ダービーシャー ・ D E 2 4 ・ 8 B J ・ ダービー ・ ピーオー ・ ボックス ・ 3 1 ・ ロールスーロイス ・ ピーエルシー内
審査官 大門 清
(56)参考文献 英国特許出願公告第 0 1 1 2 6 3 6 7 (G B , A)
特開昭 5 4 - 1 2 5 3 9 1 (J P , A)
米国特許第 0 3 5 1 0 3 9 9 (U S , A)
米国特許第 0 3 1 8 3 1 6 8 (U S , A)
英国特許出願公告第 0 1 1 1 7 3 1 5 (G B , A)
特開 2 0 1 3 - 0 4 7 6 3 3 (J P , A)
韓国公開特許第 1 0 - 2 0 1 2 - 0 0 2 9 6 9 4 (K R , A)
(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)
G 2 1 C 7 / 0 0 - 7 / 3 6
G 2 1 C 3 / 0 0 - 3 / 6 4
G 2 1 C 2 1 / 0 0 - 2 1 / 1 8